

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

В. М. Турик

ГІДРОГАЗОДИНАМІКА

Практикум

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальностями
142 Енергетичне машинобудування, 143 Атомна енергетика,
144 Теплоенергетика*

Київ

КПІ ім. Ігоря Сікорського
2021

Рецензент

В.Ю.Кравець, д-р техн. наук, ст.наук.сп., проф. кафедри атомних електростанцій та інженерної теплофізики

Відповідальний редактор

О.Ф.Луговський, д-р. техн. наук, проф. кафедри прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 7 від 13.05.2021 р.) за поданням Вченої ради Механіко-машинобудівного інституту (протокол № 7 від 22.02.2021 р.)

Електронне мережне навчальне видання

Турик Володимир Миколайович, канд. техн. наук, проф.

ГІДРОГАЗОДИНАМІКА

Практикум

Гідрогазодинаміка. Практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальностей 142 Енергетичне машинобудування, 143 Атомна енергетика, 144 Теплоенергетика / В.М. Турик; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,0 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 38 с.

В навчальному посібнику наведено типові задачі з основних розділів гідрогазодинаміки для студентів теплоенергетичного факультету з урахуванням специфіки зазначених спеціальностей. Перша частина задач передбачена для розв'язання на практичних заняттях. Складність та властивості наступних завдань стимулюють розвиток самостійного мислення при розв'язанні модульних контрольних і розрахункових робіт згідно з програмою кредитного модуля. Більшість задач передбачає багато варіантів вихідних даних. Умови задач можуть бути модифіковані викладачем для уникнення повторів в різні роки викладання дисципліни. Практикум призначений для студентів теплоенергетичного факультету та може бути корисним студентам, що вивчають дисципліни «Механіка рідини і газу» і «Фізика суцільних середовищ» відповідно за спеціальностями 131 – прикладна механіка і 105 – прикладна фізика та наноматеріали.

Зміст

1. Типові задачі для практичних занять	4
2. Типові завдання до модульних контрольних робіт	11
3. Типові завдання до розрахункових робіт	15
Додаток 1. Таблиці загального призначення	23
Додаток 2. Деякі формули для розрахунків та методичні пояснення.....	25
Додаток 3. Системи одиниць вимірювання механічних величин...	37
Література	38

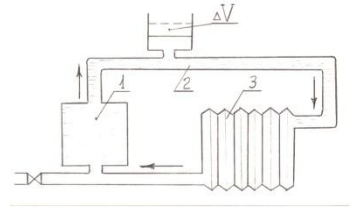
1. Типові задачі для практичних занять

Задача 1.1

Визначити об'єм води ΔV , який треба додатково подати до водопроводу $d=0,5$ м, $l=2$ км для підвищення тиску в ньому до величини p порівняно з атмосферним тиском $p_{\text{атм}} \approx 10^5$ Па. Деформацією стінок водопроводу знехтувати. Коефіцієнт об'ємного стиску води $\beta_v = -\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p} = 0,4854 \cdot 10^{-9}$ Па. Дані для розв'язання задачі у відповідності до варіанта завдання обрати з таблиці 1.

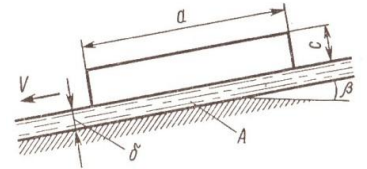
Задача 1.2

В системі опалення невеликого дому (1 – котел; 2 – труба; 3 – радіатор; 4 – розширювальний бачок) міститься об'єм води $V_1 = 0,5$ м³. Скільки води буде витіснено додатково до відкритого розширювального бачка при нагріванні від $t_1 = 20^\circ\text{C}$ до t_2 ? Дані для розв'язання задачі у відповідності до варіанта завдання обрати з таблиці 2.



Задача 1.3

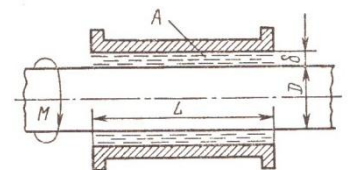
Визначити швидкість ковзання v прямокутної пластини ($a \times b \times c$) по похилій площині під кутом β до горизонталі, якщо між пластиною і площиною знаходиться шар масла A . Товщина шару масла δ , його температура t , густина матеріалу пластини ρ . Дані для розв'язання задачі у відповідності до варіанта завдання обрати з таблиці 3 і таблиці 13 Додатку 1.



Вказівка. При розв'язку задачі застосовується формула Ньютона. Оскільки шар рідини тонкий, можна вважати, що швидкість в ньому змінюється за лінійним законом.

Задача 1.4

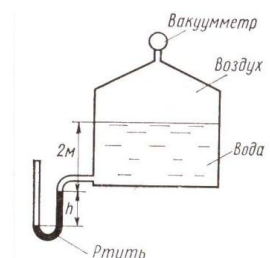
Зазор A товщиною δ між валом і втулкою заповнений мастилом. Довжина втулки L . До валу, діаметр якого D , прикладений обертаючий момент M . При обертанні вала мастило поступово нагрівається і швидкість обертання збільшується до стабільного значення. Визначити частоту обертання вала при температурі мастила t . Дані для розв'язання задачі у відповідності до варіанта завдання обрати з таблиць 4 і 13 Додатку 1.



Вказівка. При розв'язанні задачі застосовується формула Ньютона. Оскільки шар мастила тонкий, можна вважати, що швидкість в ньому змінюється за лінійним законом. Епюра дотичних напружень у шарі мастила приймається прямокутною; сила тертя проходить через центр тяжіння цієї епюри.

Задача 1.5

Визначити покази вакуумметра p_v (у ньютонів на квадратний сантиметр [Н/см^2]), встановленого на кришці конденсатора, частково затопленого водою. Покази ртутного вакуумметра,

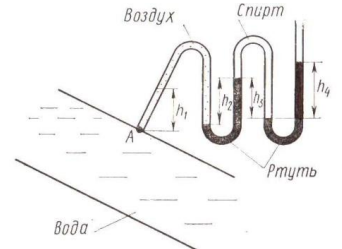


приєднаного до конденсатора, дорівнює h ; відстань до рівня води в конденсаторі від рівня ртуті у вакууметрі $2,0$ м. Дані для розв'язання задачі у відповідності до варіанта завдання і номера задачі обрати з таблиці 5.

Вказівка. При розв'язанні задачі застосувати основне рівняння гідростатики.

Задача 1.6

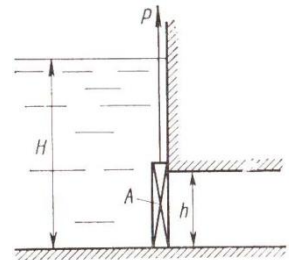
Обчислити, який надлишковий тиск буде в точці А трубопроводу, заповненого водою, якщо відомі покази ртутних дифманометрів h_2 і h_4 ; $h_1 = h_3 = 0,5$ м. Дані для розв'язання задачі у відповідності до варіанта завдання і номера задачі обрати з таблиці 5.



Вказівка. При розв'язанні задачі застосувати основне рівняння гідростатики.

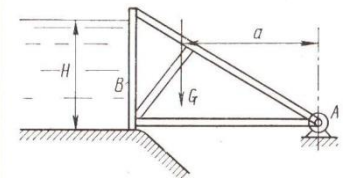
Задача 1.7

Визначити силу P , необхідну для підйому щита А, що закриває прямокутний отвір висотою $h = 4$ м и шириною $b = 6$ м. На поверхні води та за щитом тиск атмосферний. Напір води перед щитом H ; коефіцієнт тертя у направляючих щита при підйомі $f=0,02$; вага щита $1T$. Електродвигун якої потужності потрібно встановити для повного підйому щита за $t = 120$ с, якщо к.к.д. передачі дорівнює $0,70$? Визначити центр прикладання повної сили тиску води на щит А і момент цієї сили відносно центра ваги щита. Товщина щита набагато менша решти його розмірів. Дані для розв'язання задачі у відповідності до варіанта завдання і номера задачі обрати з таблиці 5.



Задача 1.8

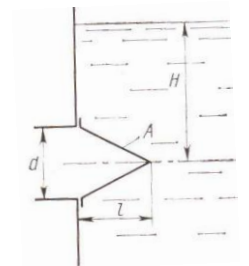
Якою повинна бути мінімальна вага вантажу G , прикладеного на відстані $a = 5$ м від центра шарніра А, щоб щит В під впливом тиску води не повертався навколо центра А? Ширина щита $b = 4$ м. Дані для розв'язання задачі у відповідності до варіанта завдання і номера задачі обрати з таблиці 5.



Вказівка. Тертям в шарнірі А знехтувати.

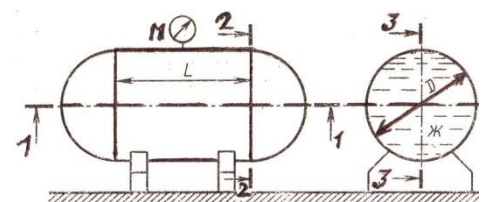
Задача 1.9

Визначити горизонтальну і вертикальну складові повної сили тиску нафти на конічну кришку А, що закриває отвір діаметром $d = 1,5$ м. Висота конічної кришки $l=2$ м. Рівень нафти у відкритій ємності H . Дані для розв'язання задачі у відповідності до варіанта завдання і номера задачі обрати з таблиці 5 і таблиці 13 Додатку 1.



Задача 1.10

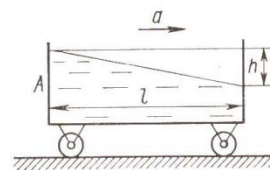
Горизонтальний циліндричний резервуар, закритий напівсферичними днищами, заповнений рідиною Ж. Довжина циліндричної частини резервуара L , діаметр D . Манометр М показує манометричний тиск p_m . Температура рідини 20° С. Визначити сили,



що розривають резервуар за перерізами: **1 – 1**, **2 – 2**, **3 – 3**. Дані для розв'язання задачі у відповідності до варіанта завдання обрати з таблиці 6 і таблиці 13 Додатку 1.

Задача 1.11

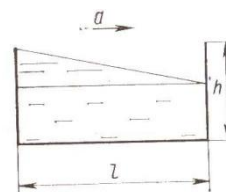
Визначити різницю рівнів бензину h біля стінок сосуду **A**, що рухається по горизонтальній площині з прискоренням a . Довжина сосуду $l = 2$ м. Дані для розв'язання задачі у відповідності до варіанта завдання і номера задачі обрати з таблиці 5.



Вказівка. При розв'язанні задачі застосувати рівняння поверхні рівня.

Задача 1.12

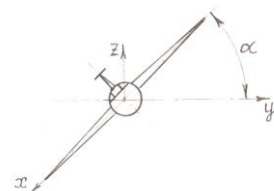
Яку максимальну кількість нафти можна налити у призматичний посуд, що має розміри: довжина $l = 5$ м, ширина $b = 2$ м і висота $h = 1,5$ м, щоб при його русі по горизонтальному шляху з прискоренням a нафта не виливалась через край задньої стінки? Дані для розв'язання задачі у відповідності до варіанта завдання і номера задачі обрати з таблиці 5.



Вказівка. При розв'язанні задачі застосувати рівняння поверхні рівня.

Задача 1.13

Літак виконує горизонтальний віраж, нахилиючи площини крил під кутом α до горизонту. Радіус віражу R . Якою повинна бути швидкість польоту літака по колу, щоб рівень палива в баку (в крилах) був паралельним площині крил (по середній лінії вздовж розмаху крил)? Дані для кута α та для радіуса R обрати у відповідності до варіанта завдання з таблиці 7.



Задача 1.14

Перед підйомом аеростату в його гондолу був поміщений термос з гарячою водою. В кінці підйому вода закипіла; температура її була t_s , що відповідає тиску кипіння p_s . Визначити висоту, на яку піднявся аеростат, прийнявши температуру повітря t_0 при тиску p_0 у поверхні Землі. Дані для t_0 , p_0 , t_s , p_s обрати у відповідності до варіанта завдання з таблиці 8.

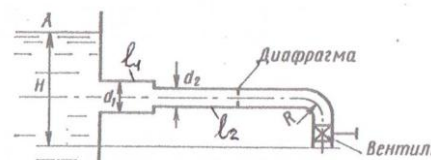
Вказівка. Термос має теплоізоляцію, але за тиском — негерметичний. Вважати рівновагу газу ізотермічною.

Задача 1.15

Визначити, при якому значенні коефіцієнта динамічної в'язкості нафти μ , відбудеться зміна режиму руху від ламінарного до турбулентного, якщо нафта протікає по трубі діаметром $d = 0,2$ м з об'ємною витратою Q . Дані для розв'язання задачі у відповідності до варіанта завдання і номера задачі обрати з таблиць 5 і 13 Додатку 1.

Задача 1.16

Визначити необхідний напір H складеного трубопроводу, що має такі розміри діаметрів і довжин ділянок:

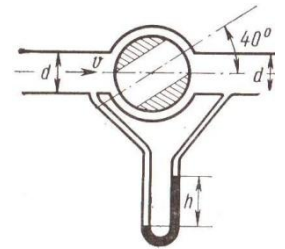


першої $d_1=250$ мм, $\ell_1=7$ м; другої $d_2=200$ мм, $\ell_2=25$ м (до прикінцевого коліна). У другій ділянці трубопроводу встановлена діафрагма з відношенням площі отвору до площі перерізу трубопроводу $S_0/S_2 = 0,5$. Відношення $R/d_2 = 5$ (коліно). На кінці трубопроводу встановлений вентиль, який повністю відкритий. Об'ємна витрата води в трубопроводі Q . Дані для розв'язання задачі у відповідності до варіанта завдання і номера задачі обрати з таблиці 5, а також з таблиць 14 і 15 Додатку 1.

Вказівка. Рівень у баку A вважати постійним; хвостову ділянку з вентилем вважати короткою, на якій втратами напору на тертя нехтувати.

Задача 1.17

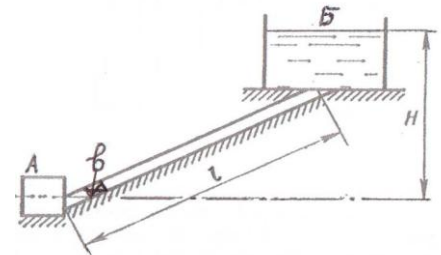
Визначити покази h ртутного дифманометра, встановленого для вимірювання втрати напору в поворотному крані. Діаметр труби $d = 100$ мм, кран прикритий на 40° від положення повного відкриття. Витрата керосину дорівнює Q . Дані для розв'язання задачі у відповідності до варіанта завдання і номера задачі обрати з таблиці 5, а також з таблиці 15 Додатку 1.



Вказівка. Питома вага керосину $\gamma = 8000$ Н/м³.

Задача 1.18

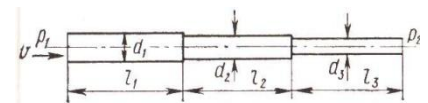
Шестеренний насос A перекачує трансформаторне масло при температурі 20°C у відкритий бак B великої ємності з постійним рівнем масла H . Діаметр нового сталевго (безшовного) трубопроводу $d=0,05$ м; витрата масла $Q = 50$ л/хв; довжина трубопроводу $l = 200$ м.



Коефіцієнт опору вентиля “в” $\zeta_v = 9,2$. Визначити, який манометричний тиск буде створювати насос на початку трубопроводу. Дані для розв'язання задачі у відповідності до варіанта завдання і номера задачі обрати з таблиці 5, а також з таблиці 13 та, в разі потреби, з таблиці 14 Додатку 1.

Задача 1.19

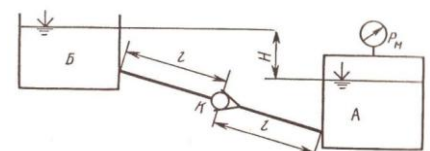
Визначити, який тиск p_2 буде в кінці горизонтального складеного трубопроводу, якщо на початку його тиск дорівнює p_1 . Труби нові, сталеві (безшовні) діаметрами: $d_1 = 0,15$ м, $d_2 = 0,125$ м, $d_3 = 0,1$ м; довжини складають $l_1 = 20$ м, $l_2 = 15$ м, $l_3 = 10$ м. Витрата нафти дорівнює Q . Розрахувати и побудувати п'єзометричну лінію. Дані для розв'язання задачі у відповідності до варіанта завдання і номера задачі обрати з таблиці 5, а також з таблиці 14 Додатку 1.



Вказівка. Врахувати місцеві втрати в місцях раптового звуження трубопроводу та на виході потоку у великий об'єм з останньої ділянки трубопроводу. Кінематичний коефіцієнт в'язкості нафти прийняти $\nu = 0,09$ см²/с.

Задача 1.20

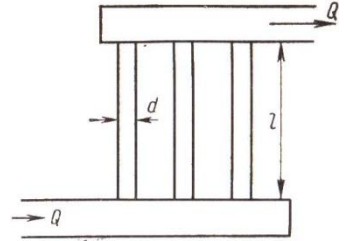
Чому має дорівнювати манометричний тиск p_m на поверхні рідини в закритому резервуарі A для того, щоб



забезпечити подачу рідини P витратою Q при температурі 20°C до відкритого резервуара B . Різниця рівнів в резервуарах H . Трубопровід із матеріалу M має довжину $2l$ і діаметр d . Посередині трубопроводу встановлений зворотний клапан K , коефіцієнт місцевого опору якого $\zeta_{\text{кл}}$. Побудувати п'єзометричну і напірну лінії. Дані у відповідності з варіантом завдання вибрати з таблиці 9, а також з таблиць 13, 14 Додатку 1.

Задача 1.21

Охолоджувач складається із трьох паралельних труб, кожна з яких має довжину $l = 15 \text{ м}$. Діаметр труб $d = 0,025 \text{ м}$. Абсолютна шорсткість труб $\Delta = 0,1 \text{ мм}$. Визначити перепад тиску на охолоджувачі, якщо витрата води в магістралі дорівнює Q . Втрати напору у колекторах великих об'ємів знехтувати. Коефіцієнти опору входу в труби й виходу з них є відповідно $\zeta_{\text{вх}}=0,7$; $\zeta_{\text{вих}}=1,2$. Дані для розв'язання задачі у відповідності до варіанта завдання і номера задачі обрати з таблиці 5.



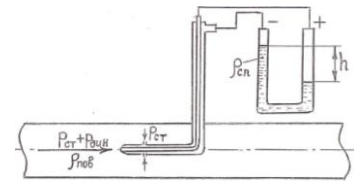
Задача 1.22

У якому співвідношенні мають бути кінематичні коефіцієнти в'язкості потоків рідин моделі та натурального об'єкта у випадку, коли для обох потоків числа Re і Fr є однаковими, але модель виконано у масштабі довжини m_e ? Дані m_e для розв'язання задачі у відповідності до варіанта завдання обрати з таблиці 10.

Задача 1.23

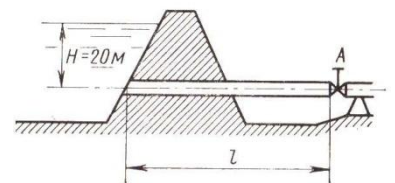
Визначити значення усередненої місцевої швидкості повітря в точці установки носика трубки Піто-Прандтля, якщо перепад висот рідини в спиртовому диференціальному манометрі дорівнює h , мм *сп. ст.* Густина повітря $\rho_{\text{пов}} = 1,25 \text{ кг/м}^3$, а спирту $\rho_{\text{сп}} = 789 \text{ кг/м}^3$.

Дані для розв'язання задачі у відповідності до варіанта завдання обрати з таблиці 11.



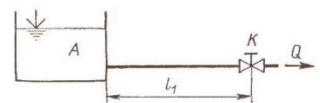
Задача 1.24

Визначити час, необхідний для закриття гідравлічного затвора A , встановленого в кінці трубопроводу, при якому тиск біля затвора не перевищить δp (у відсотках) від статичного тиску, що відповідає 20 м вод. ст. Трубопровід має внутрішній діаметр $d = 0,5 \text{ м}$ і довжину $l = 200 \text{ м}$. Витрата води дорівнює Q . Дані для розв'язання задачі у відповідності до варіанта завдання і номера задачі обрати з таблиці 5.



Задача 1.25

Рідина P по горизонтальній трубі витікає з великого резервуара A з витратою Q . Визначити ударне підвищення тиску і напруження в стінках труби перед засувкою K при її раптовому закритті. Внутрішній діаметр труби d , її довжина l , а товщина стінок δ . Матеріал труби M . Дані для розв'язання задачі у відповідності до варіанта завдання обрати з таблиць 12, 13 Додатку 1.



Таблиця 1

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p, 10^6 \text{ Па}$	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8

Таблиця 2

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_2, ^\circ\text{C}$	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90

Таблиця 3

Варіант	Масло	a	b	c	δ	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	β^0
		мм						
1	Індустріальне 12	630	420	11	0,5	830	23,0	6,0
2	Турбінне 30	360	250	53	0,6	260	35,0	11,0
3	Індустріальне 50	580	300	12	1,3	750	20,0	13,0
4	Трансформаторне	460	240	15	0,4	430	25,0	9,0
5	АМГ-10	540	350	24	0,3	240	22,0	8,0
6	Індустріальне 20	650	480	13	0,8	570	32,0	13,0
7	Касторове	250	125	17	1,4	1300	40,0	8,0
8	Веретенне АУ	920	640	5	0,7	2800	22,0	7,0
9	Індустріальне 30	810	530	6	0,6	2400	25,0	16,0
10	Синтетичне	500	320	14	1,0	880	35,0	6,5

Таблиця 4

Варіант	Масило	$t, ^\circ\text{C}$	$M, \text{ Н}\cdot\text{м}$	δ	D	L
				мм		
1	АМГ-10	46,0	5,10	2,0	300	900
2	Індустріальне 20	35,0	27,0	3,0	400	1200
3	Веретенне АУ	32,0	1,60	1,5	200	600
4	Індустріальне 12	37,0	2,10	1,0	250	750
5	Турбінне 30	42,0	1,50	1,3	150	500
6	Індустріальне 30	27,0	18,0	2,4	350	1000
7	Касторове	76,0	0,140	0,8	100	400
8	Індустріальне 50	20,0	640	3,3	500	1500
9	Трансформаторне	56,0	1,80	1,2	250	650
10	Автомобільне АКІ-10	50,0	6,5	0,9	120	800

Таблиця 5

№ задачі	Задані величини	Варіант									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.5	$h, \text{ мм рт. ст.}$	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325
1.6	$h_2, \text{ мм рт. ст.}$	600	620	640	660	680	700	720	740	760	780
	$h_4, \text{ мм рт. ст.}$	540	500	460	420	520	500	420	380	340	300
1.7	$H, \text{ м}$	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5
1.8	$H, \text{ м}$	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8
1.9	$H, \text{ м}$	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
1.11	$a, \text{ м/с}$	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
1.12	$a, \text{ м/с}$	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5
1.15	$Q, \text{ л/с}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
1.16	$Q, \text{ л/с}$	20	40	60	80	100	120	130	140	150	160
1.17	$Q, \text{ л/с}$	5	8	10	12	14	16	18	20	22	25
1.18	$H, \text{ м}$	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60
1.19	$Q, \text{ л/с}$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
	$p_1, \text{ Н/см}^2$	100	120	150	200	220	250	300	320	350	400
1.21	$Q, \text{ л/с}$	2,0	2,5	3,0	3,2	3,6	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8
1.24	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
	$\delta p, \%$	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5

Таблиця 6

Варіант	Рідина	D	L	Р _м , кПа
		м		
1	Вода прісна	1,00	1,50	15,0
2	Керосин Т-1	1,50	2,50	0,00
3	Нафта Баку, легка	2,50	3,50	45,0
4	Авіаційний бензин	2,00	3,30	21,0
5	Дизельне паливо	2,50	4,00	27,5
6	Керосин Т-2	2,00	3,50	0,00
7	Нафта Баку, важка	1,50	2,00	34,2
8	Гліцерин	3,00	4,50	26,7
9	Вода прісна	2,50	3,70	18,0
10	Масло автотракторне АКі-10	1,75	1,80	25,3

Таблиця 7

Варіант	Кут α , град.	Радіус віражу <i>R</i> , м
1	30	540
2	32	520
3	34	500
4	36	450
5	38	460
6	40	440
7	42	420
8	44	400
9	46	380
10	48	360

Таблиця 8

Варіант	t_0 , °C	p_0 , Па	t_s , °C	p_s , мм рт.ст
1	8	101335	50	92,5
2	10	101300	65	187,5
3	12	101275	70	233,7
4	14	101250	75	289
5	16	101225	83	403
6	18	101200	90	526
7	20	101175	95	634
8	22	101150	96,9	680
9	24	101125	97,7	700
10	26	101100	98,1	710

Таблиця 9

Варіант	Матеріал трубопроводу <i>M</i>	Рідина <i>P</i>	<i>Q</i> , л/с	<i>t</i> , °C	<i>H</i>	<i>l</i>	<i>d</i>	ζ _{кл}
					<i>м</i>			
1	Сталь нержавіюча	Масло трансформаторне	1,80	76	6,2	3,4	70	9,0
2	Латунь	Масло індустріальне 20	3,00	55	7,0	5,8	50	8,5
3	Сталь зварна	Масло касторове	1,10	80	5,8	3,2	60	8,0
4	Алюмінієвий сплав	Масло веретенне АУ	1,20	65	6,4	3,6	70	7,5
5	Чавун	Бензин авіаційний	2,80	69	6,7	5,0	70	6,0
6	Мідь	Керосин Т-2	3,10	75	6,2	6,2	60	5,0
7	Сталь цинкована	Гліцерин	1,50	79	7,1	2,8	70	4,5
8	Чавун	Керосин Т-1	2,50	80	6,7	4,8	50	5,5
9	Алюміній	Вода прісна	2,60	70	6,0	5,6	50	6,5
10	Сталь катана	Масло турбінне 30	1,30	40	6,5	3,5	60	7,8

Таблиця 10

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
m_e	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	1:10	1:12

Таблиця 11

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h , мм сп. ст	500	450	400	350	300	250	200	150	100	50

Таблиця 12

Варіант	Матеріал трубопроводу	Рідина Р	Q, л/с	l, м	d	δ
					мм	
1	Латунь	Масло індустріальне 30	5,00	700	32	1,8
2	Алюміній	Гліцерин	0,80	120	50	2,4
3	Латунь	Керосин Т-1	3,20	800	40	2,0
4	Сталь легована	Масло турбінне 30	1,20	150	50	1,6
5	Чавун білий	Керосин Т-2	4,00	600	40	1,8
6	Чавун чорний	Вода прісна	4,80	900	32	1,6
7	Алюміній	Масло автотракторне АКі-10	1,00	90	40	1,8
8	Сталь вуглецева	Масло індустріальне 12	1,40	120	50	2,2
9	Бронза	Масло індустріальне 20	2,80	500	32	1,6
10	Сталь легована	Вода прісна	6,00	100	50	2,0

2. Типові завдання до модульних контрольних робіт

Задача 2.1

Визначити дотичне напруження у точці на поверхні, по якій рухається ламінарно шар турбінного масла з поперечним градієнтом поздовжньої швидкості $\frac{dv}{dy} = 1, \frac{1}{c}$. Кінематичний

коефіцієнт в'язкості масла дорівнює $\nu = 3 \cdot 10^{-4}$, м²/с, густина $\rho = 900$, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Задача 2.2

Яке приблизно співвідношення додаткового тиску, зумовленого силами поверхневого натягу у сферичній краплі води радіуса $r=0,5$ мм, до атмосферного тиску ($p_{\text{атм}} = 101325$

Па)? Коефіцієнт поверхневого натягу води на межі з повітрям прийняти $\sigma = 0,073 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$.

Задача 2.3

Сила надлишкового тиску нафти на люк діаметром $d = 1$ м, що розташований на плоскій вертикальній стінці резервуару, дорівнює 8 Т. Резервуар знаходиться у атмосферному повітрі. Геометричний центр люка занурений на глибину $h = 6$ м під вільною поверхнею

нафти, манометричний тиск над якою дорівнює $p_m = 0,5 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$. Оцінити, виходячи з цих

умов, густину нафти в $\text{кг}/\text{м}^3$.

Задача 2.4

Число Рейнольдса дорівнює **900**, число Пекле – **450**. Підрахувати число Прандтля.

Задача 2.5

Середня швидкість води у каналі шириною **25 мм** дорівнює **0,462 м/с**, густина води — **0,998 г/см³**, динамічна в'язкість — **0,0011 Па·с**. Яке буде число Рейнольдса для каналу, визначене за його шириною?

Задача 2.6

Вода рухається у кільцевому каналі теплообмінника типу «труба в трубі» зі середньою швидкістю **0,462 м/с**. Зазор міжтрубного простору дорівнює **25 мм**, густина води **998 кг/м³**, динамічна в'язкість — **0,0011 Па·с**. Обрахувати число Рейнольдса для міжтрубного простору за еквівалентним (гідравлічним) діаметром.

Задача 2.7

Відомо, що число Рейнольдса для води, яка рухається в міжтрубному просторі кільцевого каналу теплообмінника типу «труба в трубі» зі швидкістю **0,462 м/с**, дорівнює **41916**. Яких розмірів (в *м*) має бути зазор міжтрубного простору, якщо густина води **998 кг/м³**, динамічна в'язкість — **0,0011 Па·с**?

Задача 2.8

Між двома циліндричними капілярами типу «капіляр у капілярі» тече рідина зі швидкістю **0,231 м/с**, зазор між капілярами дорівнює **1 мм**, густина рідини дорівнює **1000 кг/м³**, динамічна в'язкість — **0,0011 Па·с**. Обрахувати число Рейнольдса для вищеприписаної капілярної течії рідини за гідравлічним діаметром.

Задача 2.9

Яку підймальну силу щодо одиниці висоти поодинокі компресорні лопатки треба долати при роботі осевого компресора, якщо густина повітря $\rho = 1,8 \text{ кг/м}^3$, швидкість потенціального потоку, що набігає на лопатку $v = 20 \text{ м/с}$, циркуляція навколо лопатки $\Gamma = 1,111 \text{ м}^2/\text{с}$? Обмеженістю обтікання лопатки та відривами потоку знехтувати.

Задача 2.10

Місцева швидкість течії в трубопроводі системи інжекції теплоносія для відведення залишкового тепловиділення реактора дорівнює **2 м/с**, градієнт температури вздовж руху рідини складає **5°С/м**. Повна зміна температури у часі дорівнює **11°С/с**. Якою буде локальна зміна температури рідини у часі?

Задача 2.11

Маємо вертикальну трубу, заповнену водою до **5 м** висоти та герметичну знизу. Закриємо її тепер герметично зверху, залишивши деякий простір з повітрям при нормальному атмосферному тиску (**1,033 атм**). Далі дуже швидко перевернемо трубу таким чином, щоб верхня частина стала нижньою. Яким буде миттєве значення абсолютного тиску повітря (в технічних атмосферах) у нижній частині труби до моменту спливання повітря?

Задача 2.12

Середня швидкість повітря в трубі постійного поперечного перерізу збільшилась в результаті підведення теплоти. Густина повітря зменшилась порівняно з початковим значенням $\rho_1 = 1,25 \text{ кг/м}^3$ на **20%**. На скільки відсотків збільшилась середня швидкість повітря в трубі?

Задача 2.13

Знаючи, що критерій Ейлера щодо моделювання течії води у тепловиділяючому елементі (ТВЕЛ) ядерного реактору при перепаді тиску на ТВЕЛі $\Delta p = 0,3 \text{ МПа}$, середній швидкості води на вході $v_c = 1,5 \text{ м/с}$, дорівнює $Eu \approx 134$, визначити густину води в системі «СІ».

Задача 2.14

Відомо, що одновимірний рух точки рідини описується траєкторією $x = e^t + t^2$. Відшукати закони змінювання швидкості та прискорення цієї точки.

Задача 2.15

При аварійній зупинці реактора місцеві швидкості течії рідини у вхідній зоні басейну пригнічення надмірного тиску становлять 2 м/с в поздовжньому напрямку x та 1 м/с в поперечному напрямку y , градієнти температури рідини у вищезгаданих напрямках руху складають відповідно 5°C/м та 3°C/м . Відомо, що повна зміна температури у часі дорівнює 15°C/с . Якою є локальна зміна температури у часі при русі рідини за таких умов?

Задача 2.16

Який абсолютний тиск в МПа буде на дні башти з водою висотою $3,5 \text{ м}$ при густині води 1000 кг/м^3 ? Прискорення вільного падіння прийняти рівним $9,81 \text{ м/с}^2$, тиск на вільній поверхні води дорівнює нормальному барометричному (101325 Па).

Задача 2.17

Шар турбінного масла рухається ламінарно вздовж поверхні з поперечним градієнтом поздовжньої швидкості $\frac{du}{dy} = 2, \frac{1}{\text{с}}$. Кінематичний коефіцієнт в'язкості масла дорівнює $\nu = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$, густина $\rho = 900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Визначити дотичне напруження у точці на поверхні (в бар).

Задача 2.18

Дотичне напруження у точці на поверхні, по якій рухається ламінарно рідина, дорівнює $1,8 \text{ Па}$. Кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини дорівнює $\nu = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$, густина рідини $\rho = 900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Визначити поперечний градієнт поздовжньої швидкості.

Задача 2.19

Критерій Ейлера для течії води у тепловиділяючому елементі (ТВЕЛ) ядерного реактора при середній швидкості води на вході $u_c = 1,5 \text{ м/с}$ дорівнює $Eu \approx 402$ при густині води $\rho = 995 \text{ кг/м}^3$. Якому перепаду тиску в системі «СІ» на ТВЕЛі це відповідає?

Задача 2.20

Вода витікає з малого круглого отвору поблизу дна башти висотою 10 м . Оцінити швидкість струменя, якщо коефіцієнт швидкості $\varphi_0 = 0,97$.

Задача 2.21

Маємо башту, на **10 м** висоти заповнену водою. Припустимо, що у нижній частині башти, поблизу дна, утворився отвір діаметром **1 см**. Знайти силу дії струменя (у системі «СІ») на плоску стінку, що розташована поруч з баштою перпендикулярно до струменя, якщо коефіцієнт швидкості $\varphi_0 = 0,97$, густина води $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, на вільну поверхню води та поза межами башти діє атмосферний тиск.

Задача 2.22

Якщо на дні цистерни, заповненої до висоти **$h=2,5 \text{ м}$** дизельним паливом густиною $\rho = 846 \text{ кг/м}^3$, в результаті аварії утворився отвір діаметром **$d=2 \text{ см}$** , то тимчасово, до належного ремонту, його могли закрити дерев'яним чопом. На вільну поверхню пального діє атмосферний тиск. Оцінити силу гідростатичного тиску, яку повинен витримати цей чіп.

Задача 2.23

До будинку підведена вода по трубі діаметром **1 дюйм**, а в будинку діаметр труби через перехідник було зменшено до **0,5 дюйма**. Якою буде швидкість води в трубах у будинку, якщо відомо, що до будинку вона дорівнювала $u_1 = 1 \text{ м/с}$?

Задача 2.24

Вода перекачується з однієї цистерни до іншої, причому площа перерізу труби спочатку одна, потім вона вдвічі збільшується. Підрахувати статичний тиск (у технічних атмосферах) у другій ділянці труби, якщо відомо, що у першій ділянці статичний тиск — атмосферний (**101325 Па**), а швидкість води в ній дорівнює **10 м/с** при густині води $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$. Гідравлічним опором знехтувати.

Задача 2.25

На вертикальній стінці резервуару прямокутного перерізу розташований люк діаметром **$d = 1 \text{ м}$** . Геометричний центр люка занурений на глибину **$h = 5 \text{ м}$** під вільною поверхнею води густиною $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, тиск над якою дорівнює атмосферному (**1 атм**). Знайти силу надлишкового гідростатичного тиску, що має витримувати люк (у системі «СІ»).

Задача 2.26

Визначити швидкість звуку в повітрі згідно з ізоентропійною моделлю Лапласа-Пуассона при температурі **$t = 25^\circ \text{C}$** , прийнявши газову сталу **$R = 287 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$** , показник адіабати **$k = 1,4$** .

Задача 2.27

Визначити швидкість звуку в повітрі згідно з ізотермічною моделлю Ньютона при температурі **$t = 25^\circ \text{C}$** , прийнявши газову сталу **$R = 287 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$** , показник адіабати **$k = 1,4$** .

Задача 2.28

Повітря при температурі **$t = 20^\circ \text{C}$** рухається із середньою швидкістю **$u_c = 16 \text{ м/с}$** у коробі прямокутної форми перерізу з розмірами сторін **$a = 0,2 \text{ м}$** , **$b = 0,24 \text{ м}$** . Кінематичний коефіцієнт в'язкості повітря **$\nu = 0,15 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$** . Визначити число Рейнольдса за значенням гідравлічного (еквівалентного) діаметра.

Задача 2.29

Знайти значення швидкості на осі циліндричного трубопроводу внутрішнім діаметром $d = 25 \text{ мм}$ при стабілізованому стаціонарному русі рідкого пального. Масова витрата пального $Q_m = 0,8 \text{ кг/с}$, густина $\rho = 846 \text{ кг/м}^3$, кінематичний коефіцієнт в'язкості $\nu = 0,28 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.

Задача 2.30

Визначити приріст тиску води у дозвуковому дифузорі при збільшенні діаметра у два рази, якщо середня швидкість на вході $u_1 = 2,8 \text{ м/с}$. Густина води $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$. Втратами енергії при русі води знехтувати.

Задача 2.31

Визначити наближено втрати напору потоку (в метрах) при раптовому розширенні трубопроводу, якщо середні швидкості дорівнюють: на вході в ділянку $u_1 = 2 \text{ м/с}$, на виході $u_2 = 0,5 \text{ м/с}$.

Задача 2.32

Визначити абсолютну температуру гальмування повітря T_0 , якщо швидкість адіабатного руху $u = 200 \text{ м/с}$, абсолютна температура рухомого повітря $T = 300 \text{ К}$, питома теплоємність повітря $c_p = 1004 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$.

Задача 2.33

Визначити показання h (в метрах) трубки повного напору (трубки Піто) відносно точки установлення її в потоці води, де місцева швидкість дорівнює $u = 1,8 \text{ м/с}$, надлишковий статичний тиск $p_m = 9810 \text{ Па}$, густина води $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$.

Задача 2.34

Визначити втрати напору (в метрах) на тертя вздовж круглої труби внутрішнім діаметром $d = 50 \text{ мм}$ та довжиною $l = 30 \text{ м}$ при стаціонарному русі газу з середньою швидкістю $u_c = 15 \text{ м/с}$. Коефіцієнт гідравлічного тертя прийняти $\lambda = 0,02$.

Задача 2.35

Пояснити загальний принцип розрахунку втрат напору й тиску в простій різнорівневій гідравлічній системі, що складається з послідовно підключених прямолінійних ділянок трубопроводів різних діаметрів та містить місцеві опори у вигляді засувки, дифузорних і конфузорних перехідників, колін і відводів тощо.

3. Типові завдання до розрахункових робіт

(діапазони вихідних величин відповідають можливим варіантам)

Задача 3.1

Рух рідини задано проекціями швидкості $v_x = ax + bt$, $v_y = -ay + bt$, $v_z = 0$. Переконатися в можливості існування такої течії, визначити характеристики руху рідкої частинки, знайти рівняння сімейства ліній течії, побудувати картину ліній течії в момент часу $t=2$, а також лінію течії, що проходить в момент часу $t=0$ через точку $x=-b/a^2$, $y=-b/a^2$, і траєкторію частинки, яка знаходилась в цій точці в даний момент часу.

Задача 3.2

При обтіканні тіл в'язкою рідиною з великими швидкостями поблизу поверхні утворюється так званий в'язкий підшар, швидкість у якому змінюється згідно з лінійним законом $v_x = ay$ ($v_y = 0$), де y — нормаль до поверхні. Чи є течія у в'язкому підшарі потенціальною?

Задача 3.3

Розподіл швидкості по перерізу плоского каналу завширшки B при стаціонарній ламінарній течії в'язкої рідини підпорядковується параболічному закону $v_x = v_{max}(1 - 4y^2/B^2)$, $v_y = v_z = 0$. Визначити характеристики руху рідкої частинки, функцію течії ψ , рівняння сімейства ліній течії та секундну витрату рідини в каналі.

Задача 3.4

Визначити швидкість, що викликана напівнескінченною прямолінійною вихровою ниткою з інтенсивністю I , яка дорівнює циркуляції Γ , в точці A , що розташована на відстані y_0 від осі нитки і на відстані x_0 від її початку.

Задача 3.5

Потенціал швидкості плоскої течії ідеальної нестисливої рідини є заданий функцією

$\varphi = x/(x^2 + y^2)$. Знайти функцію течії $\varphi(x, y)$ для такого потоку.

Задача 3.6

Уважаючи рідину нев'язкою, визначити швидкість витікання води через насадок з резервуара в атмосферу. Рівень води в резервуарі відносно центра поперечного перерізу насадка складає $H = 5$ м, манометричний тиск повітря над вільною поверхнею води в резервуарі $p_m = (0,95 - 50)$ кПа.

Задача 3.7

Знайти швидкість повітряного потоку при температурі 15°C і тиску $p = 102000$ Па у відкритій робочій частині аеродинамічної труби діаметром $d = (0,6 - 1,2)$ м. Спиртовий чашковий манометр з'єднаний з вхідним перерізом сопла Вітошинського діаметром $D = (1,5 - 2,5)$ м і показує $h = 150$ мм. Повітря розглядати як нев'язке середовище.

Задача 3.8

Рідина коефіцієнтом динамічної в'язкості $\mu = 30 \cdot 10^{-3}$ Па·с і густиною $\rho = 900$ кг/м³ протікає по горизонтальній трубі діаметром $d = 30$ мм при стабілізованому режимі. При цьому перепад тисків, зумовлений силами опору на ділянці довжиною $l = 2$ м, складає $\Delta p = 4270$ Па. Визначити масову витрату Q_m рідини, побудувати епюру розподілу швидкості в поперечному перерізі труби. Чому дорівнює максимальна швидкість течії рідини?

Задача 3.9

Вздовж круглої горизонтальної і гідравлічно гладкої труби діаметром $d = 25$ мм тече вода при температурі 20°C , що відповідає динамічній коефіцієнт в'язкості $\mu = 1,01 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Вимірювання перепаду статичних тисків між двома поперечними перерізами ділянки довжиною $l = 3$ м дало результат $\Delta p = p_1 - p_2 = 11 \cdot 10^3$ Па. Визначити середню швидкість v_{cp} потоку в трубі.

Задача 3.10

З'ясувати закономірність розподілу осьової швидкості u в круглій концентричній кільцевій горизонтальній трубі при ламінарній течії вздовж осі в'язкої рідини. Радіуси труб R_1 і R_2 .

Задача 3.11

Крило літака має розміри $l=10$ м, $b=2$ м. Знайти підймальну силу крила при швидкості літака $v=720$ км/год і параметрах повітря $p=0,5 \cdot 10^5$ Па і $t=-20^\circ\text{C}$, якщо при випробуваннях моделі крила з розмірами $l'=200$ мм і $b'=100$ мм при тому самому куті атаки було отримано $R_y'=2$ Н при швидкості $v'=15$ м/с і параметрах повітря $p'=1,1 \cdot 10^5$ Па і $t'=20^\circ\text{C}$. Режим польоту та випробувань на моделі динамічно подібні по силах тиску.

Задача 3.12

За допомогою теорії подібності й розмірності знайти формулу для визначення моменту тертя, що діє на бокові поверхні диска, який обертається навколо осі, що проходить через його центр і є перпендикулярною його площині. Безмежний простір навколо диска заповнено в'язкою нестисливою рідиною.

Задача 3.13

Знайти час спорожнення самопливом циліндричного резервуара з горизонтальною віссю через круглий отвір діаметром $d=(50-100)$ мм, що розташований у нижній точці діаметральної площини перерізу резервуара. Довжина резервуара $L=(6-10)$ м, діаметр $D=(2-4)$ м. Втрати напору на всмоктування повітря через горловину та на проходження зливного отвору знехтувати. Конкретні значення параметрів надаються викладачем.

Задача 3.14

Знайти час вирівнювання рівнів води у суміжних резервуарах (шлюзових камерах) з постійними по висоті площами горизонтальних перерізів S_1 та S_2 . Перетікання відбувається самопливом через перепускну систему з сумарною прохідною площею перерізу S_n і коефіцієнтом витрати $\mu_n=0,4-0,6$. Значення величин S_1 , S_2 , S_n видаються викладачем.

Задача 3.15

При відносно невеликих швидкостях течії густина стисливої рідини змінюється мало. Зробіть оцінку, до якого числа M замість рівняння Бернуллі для розрахунків руху стисливої рідини можна використовувати рівняння для нестисливої рідини. Прийняти, що похибка є допустимою, якщо густина рідини змінюється не більше, ніж на 5%.

Задача 3.16

Повітря рухається зі швидкістю $u=(150-300)$ м/с, статичний тиск $p=0,5 \cdot 10^5$ Па, статична температура $T=300$ К. Знайти параметри ізоентропійного гальмування: тиск p_0 , температуру T_0 , густину ρ_0 . Задачу розв'язати по формулам та за допомогою таблиць газодинамічних функцій. Конкретні значення параметрів надаються викладачем.

Задача 3.17

Дати пояснення, чому в турбінах ефект стисливості гелію при течії його в аеродинамічних решітках значно менший, ніж при течії повітря.

Задача 3.18

Ізоентропійний одновимірний потік повітря тече по трубі змінного перерізу. В двох порівнювальних перерізах відомі числа $M_1=0,7$ і $M_2=1,4$. Знайти відношення швидкостей u_2/u_1 і температур T_2/T_1 повітря в цих перерізах. Задачу розв'язати як по формулам, так і за допомогою таблиць газодинамічних функцій.

Задача 3.19

Сопло Лавалю розраховано на співвідношення тисків $\beta_1=p_1/p_0=0,25$ (p_0 – тиск ізоентропійного гальмування, p_1 – розрахунковий статичний тиск за соплом). Визначити граничне співвідношення тисків за соплом $\beta_{гр}=p_{гр}/p_0$, при перевищенні якого витрата повітря через сопло стане менше за критичне. Течію вважати одновимірною. Показник ізоентропи $k=1,4$.

Задача 3.20

На вході до сопла Лавалю повітря має температуру T_1 , тиск p_1 і швидкість c_1 . Тиск навколишнього середовища p_n . Масова витрата повітря через сопло дорівнює Q_m , кг/с. **Потрібно:** 1) визначити параметри і швидкості повітря в мінімальному і вихідному перерізах сопла, а також діаметри мінімального, вхідного та вихідного перерізів сопла; 2) накреслити в масштабі сопло (відповідно до даних рекомендацій), знайти залежності швидкості течії u і місцевої швидкості звуку a від координати x , зобразити криві $u=f(x)$ і $a=\varphi(x)$ під соплом. Вихідні дані обираються для кожного варіанту з наведених нижче діапазонів параметрів: $T_1=(1000-2800)K$; $p_1=(1-10)MPa$; $u=(300-560)m/s$; $p_n=(0,04-0,085)MPa$; $Q_m=(100-190) кг/с$. Конкретні значення параметрів надаються викладачем.

Задача 3.21

Отримати закономірність розподілу швидкості в тонкому шарі в'язкої рідини поміж концентричними циліндрами, внутрішній з яких обертається з кутовою швидкістю ω . Радіуси внутрішнього циліндра r_1 , зовнішнього — $r_2=r_1+h$. Знайти момент сили тертя M_T , що діє на одиницю довжини циліндра. При розрахунках прийняти $\omega=40 \text{ рад/с}$, $r_1=50 \text{ мм}$, $h=0,5 \text{ мм}$, динамічний коефіцієнт в'язкості рідини $\mu=30 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$, її густина $\rho=880 \text{ кг/м}^3$.

Задача 3.22

Рідина кінематичний коефіцієнт в'язкості $\nu=3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ стікає тонкою плівкою з похилої площини при куті нахилу до горизонту $\alpha=30^\circ$. Знайти товщину плівки h і розподіл швидкості поперек плівки, якщо відома об'ємна витрата рідини на одиницю ширини похилої площини $Q=0,007 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{м})$.

Задача 3.23

Знайти закони розподілу швидкості і дотичного напруження по радіусу нескінченно довгої горизонтальної прямої труби кільцевого перерізу з внутрішнім і зовнішнім радіусами r_o і R_o , а також зв'язок між об'ємною витратою і падінням тиску. Течію вважати ламінарною і стаціонарною.

Задача 3.24

Визначити закон розподілу швидкості $v_x= v_x(y)$ та дотичного напруження $\tau_{yx}=\tau(y)$ при стаціонарній ламінарній течії в'язкої рідини між двома паралельними нерухомими

горизонтальними необмеженими площинами, які розташовані на відстані h одна від другої. Знайти співвідношення між середньою швидкістю v_c та падінням тиску на одиницю довжини в напрямку течії.

Задача 3.25

Знайти закон розподілу швидкості, тиску та дотичного напруження у в'язкій рідині, яка знаходиться поміж двох нескінченно довгих концентричних циліндрів радіусами r_o і R_o , що обертаються навколо осі з постійними кутовими швидкостями ω_1 і ω_2 . Визначити вираз моменту сил тертя M_x відносно осі обертання.

Вказівка. Застосувати узагальнену гіпотезу Ньютона в циліндричних координатах:

$$\tau_{r\theta} = \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r} \right).$$
 При інтегруванні рівнянь руху вважати рух по концентричних колах плоским ($v_x=0$, $v_r=0$), причому $\partial p / \partial \theta = 0$, ламінарним з лініями течії у вигляді кіл. Масовими силами знехтувати.

Задача 3.26

Знайти закон розподілу швидкості, нормальних і дотичних напружень, а також момент сили тертя на одиницю довжини вздовж осі обертання при обертанні кругового нескінченного циліндра радіусом r_o в безмежній рідині з кутовою швидкістю ω .

Вказівка. При розрахунку використати залежності, отримані в попередній задачі.

Задача 3.27

Плоска гладка пластина довжиною $l=0,6$ м та шириною $b=0,5$ м обтікає потік повітря зі швидкістю $v_0=2; 4; 6; 8; 10; 12; 14; 16; 18; 20$ м/с. Параметри повітря: абсолютний тиск $p=10^5$ Па, температура $T=293$ К. Визначити силу тертя $R_{тр}$, що діє на обидві сторони пластини. Конкретні значення параметрів надаються викладачем.

Задача 3.28

Плоска гладка пластина довжиною $l=2$ м та шириною $b=0,8$ м обтікає потік води зі швидкістю $v_0 = 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5$ м/с. Температура води $T=303$ К. Визначити силу тертя $R_{тр}$, що діє з одної сторони пластини.

Конкретні значення параметрів надаються викладачем.

Вказівка. Скористатися таблицею 13 для визначення густини при даній температурі (див. Додаток 1, Таблиці загального призначення).

Задача 3.29

Плоска пластина розміром $L \times B = 20 \times 2$ м буксирується в прісній воді (кінематичний коефіцієнт в'язкості $\nu = 1,3 \cdot 10^{-6}$ м²/с) спочатку по одному, а потім по другому напрямку. Визначити опір тертя при русі вздовж довгої R_L та вздовж короткої R_B сторін пластини. Швидкості буксирування: 1) $v_0=0,02$ м/с; 2) $v_0=0,2$ м/с; 3) $v_0=2$ м/с.

Задача 3.30

По шару рідини товщиною $b=0,5$ мм на похилій площині рухається паралельно їй від кутом $\alpha = 15^\circ$ до горизонталі пластинка з постійною швидкістю $v_0=0,2$ м/с. Знайти закон розподілу швидкостей в шарі рідини та об'ємну витрату на одиницю ширини похилої

площини, а також визначити дотичне напруження τ_0 на поверхні пластинки. Густина рідини $\rho=900 \text{ кг/м}^3$, динамічний коефіцієнт в'язкості рідини $\mu=0,2 \text{ Па}\cdot\text{с}$. Масою пластинки нехтувати.

Задача 3.31

Пластинка масою $m=0,8 \text{ кг}$ ковзає по напрямних вздовж похилого шару рідини, товщина якого $b=0,5 \text{ мм}$. Визначити динамічну в'язкість μ рідини, якщо швидкість рівномірного руху пластинки $v_0=0,5 \text{ м/с}$, кут нахилу площини з шаром рідини до горизонту $\alpha=12^\circ$, густина рідини $\rho=900 \text{ кг/м}^3$.

Задача 3.32

З великого відкритого резервуара А, у якому підтримується постійним рівень рідини, по трубопроводу, який включає дві послідовно з'єднаних труби довжинами l_1, l_2 , внутрішніми діаметрами d_1, d_2 , рідина (**варіанти:** масло трансформаторне, вода прісна, масло веретенне марки АУ, бензин авіаційний, керосин Т-1, керосин Т-2, гліцерин, масло турбінне, дизельне пальне, масло індустріальне 30, *див. табл. 13 для фізичних властивостей рідин*), при температурі $t=20^\circ\text{C}$ перетікає в нижче розташований відкритий резервуар Б під постійний рівень рідини. Абсолютна еквівалентна шорсткість труб $k_e=0,1 \text{ мм}$. Різниця рівнів рідини в резервуарах складає H . Всередині першої труби більшого діаметру встановлено повністю відкриту засувку. З'єднання труб відповідає раптовому звуженню. Визначити об'ємну витрату рідини, що протікає по трубопроводу. Відповідно до варіантів, прийняти значення геометричних параметрів з таких діапазонів: $H=(6,2-9,2) \text{ м}$; $l_1=(6,8-13,0) \text{ м}$; $l_2=(7,4-13,1) \text{ м}$; $d_1=(40-70) \text{ мм}$; $d_2=(32-50) \text{ мм}$.

Конкретні значення параметрів надаються викладачем.

Вказівка. Скористатися таблицями 13—15 (див. Додаток 1, Таблиці загального призначення).

Задача 3.33

Знайти об'ємну витрату води Q в магістральному трубопроводі діаметром 200 мм , якщо в паралельній байпасній вітці діаметром 50 мм і довжиною 7 м з двома колінами витратомір дає показ $Q_2=5 \text{ л/с}$. Коефіцієнт втрат напору в витратомірі вважати рівним $\zeta=1,5$; коефіцієнти гідравлічного тертя на двох вітках трубопроводу прийняти $\lambda_1 \approx \lambda_2=0,025$. Довжина основної ділянки трубопроводу (від «точки» розгалуження до «точки» злиття потоків) дорівнює $L=5 \text{ м}$.

Задача 3.34

У баку з постійним рівнем рідини остання підігрівається до температури $t^\circ\text{C}$ і самопливом по трубопроводу з матеріалу М довжиною $l=25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60; 65; 70 \text{ м}$ подається до технологічного устаткування. Геометричний напір у баку дорівнює H . Яким має бути діаметр трубопроводу, що забезпечує подачу рідини об'ємною витратою Q при манометричному тиску в кінці трубопроводу не нижче $p_m=15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23; 24 \text{ кПа}$. При розрахунках прийняти, що місцеві втрати напору складають 20% від втрат за довжиною. Скористатися таблицею 9, крім колонок для l, d та $\zeta_{кл}$.

Конкретні значення параметрів надаються викладачем.

Вказівка. Скористатися таблицею 9, крім колонок для l, d та $\zeta_{кл}$.

Задача 3.35

Насос подає воду з колодязя, забезпечуючи витрату $Q=20$ л/с. Довжина всмоктувальної труби $L=30$ м, її внутрішній діаметр $D=200$ мм. До складу всмоктувальної труби входять: запобіжна сітка, зворотний всмоктувальний клапан, три коліна 90° та шиберна засувка. Визначити висоту H центра насоса над рівнем води в колодязі, якщо допустимий вакуумметричний напір на вході насоса складає $H_{\text{вак}}=6$ м вод. ст.

Вказівка. Коефіцієнт місцевого опору вузла «запобіжна сітка—зворотний клапан» прийняти таким, як для приймального клапана насоса (див. таблицю 15 Додатку, Таблиці загального призначення).

Задача 3.36

Визначити, у скільки разів найбільша швидкість повітря у поверхні обтічного тіла перевищує швидкість потоку, що набігає, якщо в момент настання хвильової кризи швидкість потоку, що набігає, $v_\infty = 200$ м/с, а температура гальмування $t_0, ^\circ\text{C}$ у передній критичній точці тіла (де швидкість повітря дорівнює нулю) складає (по варіантах): 160, 165, 170, 175, 180, 185, 190, 195, 200, 205 $^\circ\text{C}$.

Конкретні значення параметрів надаються викладачем.

Вказівка. Для повітря прийняти газову сталу $R = 287,14 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$.

Задача 3.37

Визначити температуру потоку вуглекислого газу удалині від поверхні колового циліндра при обтікання потенціальним потоком, якщо при настанні хвильової кризи температура в передній критичній точці циліндра t_0 дорівнює: 220; 230; 240; 250; 260; 270; 280; 290; 300; 310 $^\circ\text{C}$. Конкретні значення параметрів надаються викладачем.

Вказівки. 1. Хвильова криза виникає тоді, коли **місцева** швидкість газового потоку досягає швидкості звуку.

2. Питома газова постійна вуглекислого газу $R_{\text{CO}_2} = 188,9$ Дж/(кг·К).

3. Пам'ятаємо, що при потенціальному обтіканні колового циліндра найбільша швидкість спостерігається на його поверхні в точках $\theta = \pm \pi/2$ (найбільш віддалених від центра кола в площині, нормальній до вектора швидкості потоку, що набігає).

Задача 3.38

Газ ($k = 1,25$) витікає з бака через сопло, що звужується. В баку підтримується постійний тиск $p_0 = 1,8 \cdot 10^5$ Па, швидкості повітря в ньому можна вважати нескінченно малими. Визначити тиск у вихідному перерізі сопла для двох випадків тиску p' в зовнішньому просторі за соплом: $1,2 \cdot 10^5$ Па; $0,8 \cdot 10^5$ Па.

Вказівка. Пригадати аналіз формули Сен-Венана і Вантцеля з підрозділу «Витікання газу з великої ємності через отвори або сопла». Порівняти у двох випадках співвідношення

$$p'/p_0 \text{ з критичним значенням величини } \beta_* = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}.$$

Задача 3.39

Визначити, при якому значенні числа Маха-Маїєвського потоку M , що набігає, настане хвильова криза при поперечному обтіканні колового циліндра потоком повітря температурою $t_{\infty} = 100^{\circ}\text{C}$ та знайти температуру, до якої нагрівається циліндр в передній критичній точці.

Вказівка. Вважати, що розподіл швидкості аналогічний розподілу її в нестисливій рідині.

Задача 3.40

Знайти необхідну верхню границю вимірювань термометра для визначення температури газового потоку при максимальній швидкості $v_{\infty} = 1000 \text{ м/с}$, якщо при цій швидкості кут конуса збурень Маха $\alpha = 30^{\circ}$. Коефіцієнт неповноти гальмування чутливої частини термометра $\beta' = 0,8; 0,85$. Вид газу: O_2 ; N_2 ; повітря; CO_2 ; CO (варіанти завдань передбачають різні сполучення даних щодо виду газу та β'). Визначити також температуру газового потоку, що набігає, T_{∞} .

ДОДАТОК 1

Таблиці загального призначення

Таблиця 13. Середні значення щільності ρ і кінематичної в'язкості ν деяких рідин

Рідина	Густина, кг/м^3 , при $t, ^\circ\text{C}$		Кінематична в'язкість, Ст , при $t, ^\circ\text{C}$			
	20	50	20	40	60	80
Вода прісна	998	—	0,010	0,0065	0,0047	0,0036
Нафта Баку, легка	884	—	0,25	—	—	—
Нафта Баку, важка	924	—	1,4	—	—	—
Бензин авіаційний	745	—	0,0073	0,0059	0,0049	—
Керосин Т-1 очищений	808	—	0,025	0,018	0,012	0,010
Керосин Т-2 тракторний	819	—	0,010	—	—	—
Дизельне пальне	846	—	0,28	0,12	—	—
Гліцерин	1245	—	9,7	3,3	0,88	0,38
Ртуть	13550	—	0,0016	0,0014	0,0010	—
Масла						
Касторове	960	—	15	3,5	0,88	0,35
Трансформаторне	884	880	0,28	0,13	0,076	0,084
АМГ-10	—	850	0,17	0,11	0,085	0,065
Веретенне АУ	—	892	0,48	0,19	0,098	0,059
Індустріальне 12	—	883	0,48	0,19	0,98	0,059
Індустріальне 20	—	891	0,85	0,33	0,14	0,080
Індустріальне 30	—	901	1,8	0,56	0,21	0,11
Індустріальне 50	—	910	5,3	1,1	0,38	0,16
Турбінне 30	—	900	0,97	0,38	0,16	0,088
Автотракторне АКІ-10	—	898	5,0	1,1	0,45	0,20
Синтетичне	882	—	0,9	0,7	0,5	0,3

Вказівка. Густина рідини при іншій температурі можна визначити за формулою $\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \alpha \Delta t}$, де ρ_t — густина рідини при температурі $t = t_0 + \Delta t$; Δt — зміна температури (з урахуванням знаку); t_0 — температура, при якій густина рідини дорівнює ρ_0 ; α — коефіцієнт температурного розширення рідини (в середньому для мінеральних масел можна прийняти $\alpha = 7,0 \cdot 10^{-4} \text{ } 1/^\circ\text{C}$).

Таблиця 14. Значення еквівалентної абсолютної шорсткості для різних труб

Матеріал і вид труби	Стан труби	$\Delta_{\text{екв}}$ мм
Тягнуті зі скла і кольорових матеріалів	Нові, технічні гладкі	0,000 — 0,002
Безшовні сталеві	Нові	0,01 — 0,02
Сталеві зварні	Після кількох років експлуатації	0,15 — 0,3
	Нові	0,03 — 0,10
Чавунні	Нові	0,2 — 0,5
	Використовувані раніше	0,5 — 1,5

**Таблиця 15. Значення коефіцієнтів місцевих опорів для
трубопровідної арматури
(для квадратичної області опору)**

<i>Вид арматури</i>	ζ_m
<i>Приймальні клапани насосів</i>	6 — 5
<i>Зворотні клапани</i>	6,5 — 5,5
<i>Вентиль звичайний</i>	7 — 16
<i>Засувки при повному закритті</i>	0 — 12
<i>Кран прохідний</i>	2 — 4
<i>Вентиль з косим шпинделем</i>	2 — 3
<i>Шиберна засувка</i>	0,5 — 1,5
<i>Коліно 90°</i>	0,2
<i>Трійник</i>	0,3

ДОДАТОК 2

Деякі формули для розрахунків та методичні пояснення

2.1. Гідростатичний тиск

При рівновазі (спокої) рідини з усіх напружень в ній діють тільки нормальні напруження. Напруження нормальної стискуючої поверхневої сили при рівновазі рідини називається гідростатичним тиском (далі в цьому підрозділі – просто «тиском»). Таким чином, **тиск** — це нормальне напруження поверхневої сили, що діє перпендикулярно площинці ΔS в напрямку даної точки цієї площинки

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta S}, \text{ Па}$$

де ΔP – елементарна нормальна поверхнева сила тиску, H .

У випадку рівномірно розосередженої силової дії на площину S маємо тиск

$$p = \frac{P}{S},$$

де P – рівнодіюча сила тиску.

Основна властивість гідростатичного тиску: в даній точці рідини він є однаковим у всіх напрямках.

Види тиску:

1. Абсолютний тиск p – це тиск, що вимірюється відносно тиску в порожнечі (який дорівнює нулю).

2. Атмосферний, або барометричний, тиск $p_{\text{атм}}$ – це абсолютний тиск атмосферного повітря.

За нормальних умов урівноважується стовпчиком ртуті висотою 760 мм рт.ст (це 1 *фізична атмосфера*).

3. Манометричний, або надлишковий, тиск p_m – це різниця між абсолютним і атмосферним тиском, коли абсолютний тиск більше за атмосферний (випадок I):

$$p_m = p - p_{\text{атм}}.$$

4. Вакуумметричний тиск (розрідження) p_v – це різниця між атмосферним і абсолютним тиском, коли абсолютний тиск менший за атмосферний (випадок II):

$$p_v = p_{\text{атм}} - p.$$

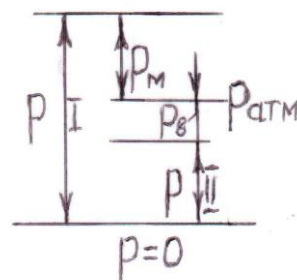
Манометричний тиск вимірюється механічними, рідинними манометрами, а також електромагнітними та електронними приладами; вакуумметричний тиск — вакуумметрами аналогічних типів.

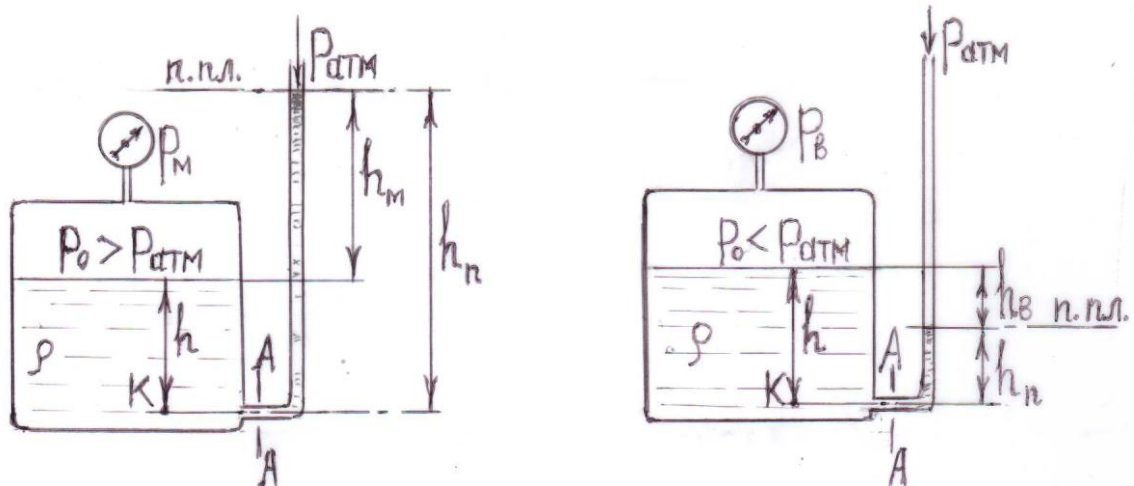
Основне рівняння гідростатики має наступний вигляд:

$$p = p_0 + \rho gh, \quad (2.1)$$

тобто тиск p у будь-якій точці нестисливої (краплинної) рідини на глибині h відносно вільної поверхні складається з тиску p_0 на вільну поверхню, а також з вагового тиску ρgh (за рахунок товщі рідини).

При відносно невеликих величинах тиску в ємкостях з краплинною рідиною манометричний або вакуумметричний тиск в лабораторних умовах вимірюють так званими **п'єзометрами** – скляними трубками невеликого діаметру, що під'єднані до ємкості (див. рисунки).





Горизонтальна площина, яка проходить через рівень витисненої рідини в п'єзометрі, має назву п'єзометричної площини (*п. пл.*). Як визначити висоту підйому рідини в п'єзометрі (*п'єзометричну висоту h_n*)? Відповідь: на підставі основного рівняння гідростатики. Розглянемо два зображені на рисунку варіанти.

В лівій ємкості з нерухомою рідиною при надлишковому тиску над вільною поверхнею на умовний переріз $A-A$ в нижній частині п'єзометра мають діяти однакові тиски з обох сторін: $p_{\rightarrow A-A} = p_{A-A \leftarrow}$.

Згідно з основним рівнянням гідростатики умова балансу тисків дає:

$$p_0 + \rho gh = p_{атм} + \rho gh_n. \quad (2.2)$$

Враховуючи, що абсолютний тиск на вільну поверхню рідини в ємкості $p_0 = p_{атм} + p_m$, де p_m – це показ манометра, з рівняння (2.2) отримаємо

$$h_n = \frac{p_m}{\rho g} + h, \quad (2.3)$$

де вираз $\frac{p_m}{\rho g} = h_m$ одразу дає змогу по манометричному тиску над вільною поверхнею рідини в ємкості визначити положення п'єзометричної площини відносно вільної поверхні.

В правій ємкості при деякому розрідженні над вільною поверхнею умова балансу тисків зберігає вид (2.2), але абсолютний тиск на вільну поверхню $p_0 = p_{атм} - p_v$, де p_v – показ вакуумметра. Підстановка p_0 в (2.2) дає п'єзометричну висоту

$$h_n = h - \frac{p_v}{\rho g}, \quad (2.4)$$

де вираз $\frac{p_v}{\rho g} = h_v$ дозволяє по вакуумметричному тиску над вільною поверхнею рідини в ємкості також визначити положення п'єзометричної площини відносно вільної поверхні.

2.2. Сили гідростатичного тиску на елементи резервуарів

У більшості практичних випадків такі елементи стінок резервуарів, як люки і кришки, мають симетричну форму, тому достатньо розраховувати тільки горизонтальну та вертикальну проекції повної сили тиску на їх поверхні. На підставі отриманих даних легко

знайти і повну силу тиску. Викладені нижче правила однаково справедливі як для криволінійної, так і для прямолінійної стінок.

До прикладу, нехай треба знайти силу тиску на умовний фрагмент AB криволінійної стінки. Виконуються побудови: вертикальної проекції розрахункового елемента стінки площею S_θ , а також так званого «тіла тиску» $AmnB$ (див. детально нижче).

2.2.1. Горизонтальна проекція повної сили тиску:

$$P_2 = \rho g h_c S_\theta, \text{ Н}, \quad (2.5)$$

де ρ — густина рідини, кг/м^3 ; g — прискорення вільного падіння, м/с^2 ; h_c — відстань від п'єзометричної площини до центра ваги «С» площі вертикальної проекції S_θ розрахункового елемента (стінки), м.

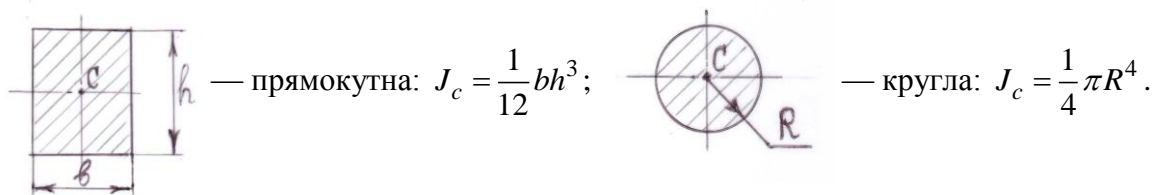
Лінія дії P_2 проходить через центр тиску «D» площі S_θ , який відстоїть від точки «С» на відстані

$$\Delta h = \frac{J_c}{h_c S_\theta}, \text{ м}, \quad (2.6)$$

де J_c — центральний момент інерції площі вертикальної проекції розрахункового елемента відносно горизонтальної осі, що проходить через центр ваги «С» площі вертикальної проекції стінки, м^4 .

Лінія дії P_2 лежить в площині симетрії S_θ та зсунута вниз від точки «С», якщо $h_c > 0$ (як на рисунку, коли п'єзометрична площина вище вільної поверхні рідини в резервуарі) та уверх — якщо $h_c < 0$.

Для більшості практичних задач найбільш характерними є такі форми вертикальної проекції стінок:



П'єзометрична площина проходить через рівень рідини в трубці не показано на рисунку умовного п'єзометра при його підключенні до резервуара в будь-якій зануреній в товщі рідини точці (наприклад, у будь-якій точці дна посудини). Якщо на вільній поверхні рідини в резервуарі діє надлишковий (манометричний) тиск, то п'єзометрична площина розташована вище вільної поверхні (див. рис.). Якщо ж на вільній поверхні діє розрідження (вакуумметричний тиск), то п'єзометрична площина мала б лежати нижче вільної поверхні, і тоді мали б $h_c < 0$.

2.2.2. Вертикальна проекція повної сили тиску:

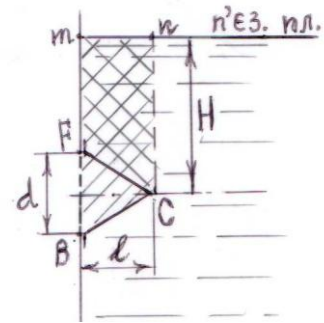
$$P_g = \rho g V_{T.T}, \text{ Н}, \quad (2.7)$$

де $V_{T.T}$ — об'єм «тіла тиску» $AmnB$, яке обмежене стінкою розрахункового елемента, п'єзометричною площиною та вертикальною проектуючою поверхнею, що побудована на контурі стінки, м^3 (в конкретних задачах «тіло тиску» саме так і будують).

Вертикальна лінія дії P_g проходить через центр ваги $C_{T.T}$ об'єму «тіла тиску» та спрямована вниз, якщо «тіло тиску» побудоване зі змоченої сторони стінки, та уверх — якщо з незмоченої сторони. На рисунку наведено перший варіант.

2.2.3. Особливий випадок утворення тіла тиску.

При знаходженні сил тиску на конічну (або напівсферичну в інших задачах) кришку, як на рисунку, правила залишаються тими самими. Але ми бачимо, що на кришку діє два «тіла тиску»: на верхню половину кришки це $FmnC$, яке побудоване зі змоченої сторони кришки (умовимося, що з додатним знаком, і тоді, за аналогією з наведеним в 2.1 прикладом, відповідна вертикальна проекція сили тиску мала б бути спрямована вниз); на нижню половину конічної кришки діє «тіло тиску» $BmnC$, що побудоване з незмоченої (повітряної) сторони, тому, згідно з правилом, вертикальна проекція сили тиску на цю половину кришки мала б бути спрямована уверх (що за логікою відповідало б від'ємному значенню). Результируюча вертикальна проекція сили тиску набуває виразу



$$P_g = \rho g (V_{FmnC} - V_{BmnC}) = -\rho g V_{BFC}. \quad (2.8)$$

Таким чином, остаточне тіло тиску являє собою лише конус BFC , а знак мінус указує, що результируюча (від двох «тіл тиску») вертикальна проекція сили тиску діє на кришку знизу уверх, якби зрізаючи болти кріплення кришки. Такий напрямок дії цієї сили викликає, на перший погляд, подив (бо зверху над кришкою великий стовп рідини). Але треба враховувати, що нижня половина кришки знаходиться на більшій глибині, ніж верхня половина, що й зумовлює отриманий вище результат. Вертикальна лінія дії P_g проходить через центр ваги об'єму конічного «тіла тиску», який, як ми знаємо, знаходиться на відстані $1/4$ висоти конуса від його основи.

Щодо горизонтальної проекції P_z сили тиску, то її легко відшукати за формулою

(2.5) при $S_g = \frac{\pi d^2}{4}$ (площа звичайного круга). Положення лінії дії визначається на підставі формули (2.6) і пояснень під нею.

2.2.4. Модуль повної сили тиску на стінку розрахункового елемента знаходиться згідно з теоремою Піфагора, причому точка прикладання повної сили тиску утворена перетином ліній дії її горизонтальної та вертикальної складових:

$$P = \sqrt{P_z^2 + P_g^2}. \quad (2.9)$$

Кут φ нахилу результируючої сили \vec{P} до горизонту визначається з формули $\text{tg} \varphi = P_z / P_g$.

2.3. Втрати напору в трубопроводній системі

2.3.1. Загальні відомості.

Напором називається механічна енергія одиниці ваги рідини, що рухається, тобто її питома енергія з розмірністю $\text{Дж}/\text{Н} = \text{м}$.

Повний гідродинамічний напір рідини у будь-якому поперечному перерізі потоку може бути виражений формулою

$$E = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha v_c^2}{2g}, \quad (2.10)$$

де z – питома (зведена до одиниці ваги) потенціальна енергія положення, або **геометричний напір** (висота положення центра живого перерізу потоку над площиною порівняння), м ;

$\frac{p}{\rho g}$ – питома потенціальна енергія абсолютного тиску p (при урахуванні тільки надлишкового, тобто манометричного, тиску p_m маємо $\frac{p_m}{\rho g}$ – питому потенціальну енергію манометричного тиску, або п'єзометричну висоту в даному перерізі), м ; ρ – густина рідини, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$z + \frac{p}{\rho g}$ – повна потенціальна енергія одиниці ваги рідини, що рухається, або **гідростатичний напір** (вираз $z + \frac{p_m}{\rho g}$ в гідромеханіці називають **п'єзометричним напором**);

$\frac{\alpha v_c^2}{2g}$ – питома кінетична енергія рідини, або **швидкісний напір** («швидкісна висота»), м ; v_c – середня в даному перерізі потоку швидкість рідини; α – коефіцієнт кінетичної енергії Коріоліса, який характеризує ступінь нерівномірності реального розподілу (епюри) швидкості в поперечному перерізі потоку (чим більше одиниці величина α , тим більше епюра швидкості деформована, тобто її форма відрізняється від прямокутної).

При русі в'язкої рідини запас її енергії зменшується — частина енергії витрачається на подолання гідравлічного опору руху. Ця «втрачена» енергія перетворюється в теплову і розсіюється в навколишньому просторі (має місце так звана **дисипація** енергії).

Баланс механічної енергії нестисливої в'язкої рідини, що рухається стаціонарно, для двох послідовно розташованих перерізів потоку виражається **рівнянням Данієла Бернуллі**, яке має вигляд

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_{c1}^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_{c2}^2}{2g} + h_\ell, \quad (2.11)$$

де сума членів з індексами 1 виражає питому енергію у першому перерізі потоку, а з індексами 2 — у другому перерізі; h_ℓ – втрати напору (енергії) на ділянці між перерізами 1 і 2.

Розрізняють такі втрати напору: **на тертя по довжині потоку** (h_ℓ) — втрати, викликані тертям в самій рідині та тертям рідини об тверду поверхню, в межах якої

рухається рідина; **місцеві втрати напору** (h_m) на ділянці між перерізами 1 та 2. Місцеві опори виникають в місцях розташування різноманітних перешкод на шляху потоку, коли змінюється швидкість руху рідини за величиною або напрямком. Типові приклади таких ділянок у системі наведено на рисунку нижче.

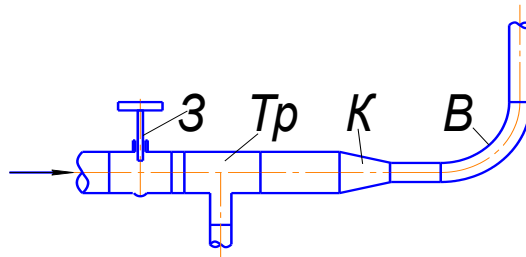


Схема трубопроводу з ділянками місцевих опорів: З — засувка;
Тр — трійник; К — конфузор; В — відвід.

Експериментальним шляхом втрати напору на будь-якій ділянці трубопроводу, в тому числі з місцевим опором, можна визначити з рівняння (2.11) як різницю питомих енергій на початку та в кінці ділянки

$$h_e = (z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_{c1}^2}{2g}) - (z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_{c2}^2}{2g}), \quad (2.12)$$

$$\text{або почленно:} \quad h_e = (z_1 - z_2) + (\frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g}) + (\frac{\alpha_1 v_{c1}^2}{2g} - \frac{\alpha_2 v_{c2}^2}{2g}). \quad (2.13)$$

Таким чином, для експериментального визначення втрат напору досить виміряти різницю висот $z_1 - z_2$ положень центрів ваги поперечних перерізів потоку над площиною порівняння, різницю показів п'єзометрів $\frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g} = \frac{p_{m1}}{\rho g} - \frac{p_{m2}}{\rho g}$, а також різницю швидкісних напорів у відповідних перерізах $\frac{\alpha_1 v_{c1}^2}{2g} - \frac{\alpha_2 v_{c2}^2}{2g}$. У випадку, коли рідина тече в горизонтальній ділянці ($z_1 = z_2$) змінного поперечного перерізу, втрати напору визначаються як

$$h_e = h_m = (\frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g}) + (\frac{\alpha_1 v_{c1}^2}{2g} - \frac{\alpha_2 v_{c2}^2}{2g}). \quad (2.14)$$

Використання формул (2.13) і (2.14) ускладнюється необхідністю урахування величин коефіцієнта кінетичної енергії α у вхідному та вихідному перерізах досліджуваної ділянки трубопроводу, що передбачало б вимірювання в них просторових профілів швидкості (це складає зміст достатньо ємкої експериментальної роботи). За відсутністю такої можливості на практиці приймається таке припущення для найчастіше маючих місце турбулентних режимів течії: в зазначених перерізах $\alpha_1 \approx \alpha_2 \approx 1$, що дає тим меншу похибку, чим більше значення числа Рейнольдса (у **стабілізованому** турбулентному потоці в круглій трубі $\alpha \approx 1,025 \dots 1,13$, причому нижня межа відповідає більшим величинам числа Рейнольдса).

Якщо вивчається **стабілізована** течія в горизонтальній трубі сталого перерізу ($v_c = const$), то навіть за умов $\alpha \neq 1$ (нагадаємо, що в стабілізованих потоках:

ламінарному $\alpha = 2$; турбулентному $\alpha = 1,025 \div 1,13$) рівняння (4) дозволяє визначити втрати напору на тертя по довжині труби виключно за показами п'єзометрів:

$$h_g \equiv h_l = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g} = \frac{P_{m1}}{\rho g} - \frac{P_{m2}}{\rho g}. \quad (2.15)$$

Розрахунковим шляхом будь-які втрати напору визначаються у частках швидкісного напору за однотипною формулою $h_g = \zeta \frac{v_c^2}{2g}$, де ζ – коефіцієнт гідравлічного опору.

У випадку втрат напору на тертя по довжині ℓ каналу будь-якої форми поперечного перерізу (круглої, прямокутної, кільцевої тощо) маємо: $h_g \equiv h_\ell$ і $\zeta = \lambda \frac{\ell}{D}$, де D – гідравлічний діаметр (пам'ятаємо, що $D \equiv d$ для круглої труби внутрішнім геометричним діаметром d), λ – **коефіцієнт гідравлічного тертя**, який залежить від числа Рейнольдса, від форми поперечного перерізу каналу, а в турбулентному потоці — також, у загальному випадку, від відносної шорсткості стінок каналу.

У випадку місцевих втрат напору $h_g \equiv h_m$ і коефіцієнт $\zeta = \zeta_m$ називають коефіцієнтом місцевого опору, що залежить від геометричної форми стінок каналу, а також (меншою мірою) від числа Рейнольдса.

2.3.2. Розрахункове визначення втрат напору на тертя по довжині труби.

При проектуванні та інженерних розрахунках гідравлічних систем застосовують **формулу Дарсі-Вейсбаха**

$$h_\ell = \lambda \frac{\ell}{d} \frac{v_c^2}{2g}, \quad (2.16)$$

де $v_c = Q/S$ — середня за перерізом швидкість рідини в трубі, м/с; Q – об'ємна витрата рідини, м³/с; S – площа поперечного перерізу труби, м²; ℓ , d – довжина і діаметр труби, м; λ – коефіцієнт гідравлічного тертя [2–5].

При ламінарному режимі ізотермічної течії рідини дотичні напруження τ_m обумовлені лише **молекулярною** або **фізичною в'язкістю** рідини та визначаються відомим законом тертя Ньютона.

В турбулентному потоці дотичні напруження молекулярної природи домінують тільки у безпосередній близькості до стінки (у достатньо тонкому так званому «**в'язкому підшарі**», що підгальмований силами взаємного притягання між молекулами твердої

стілки і рідини, а також між молекулами самої рідини). Товщина δ в'язкого підшару залежить від величини Re і визначає характер обтікання виступів шорсткості поверхні.

В «турбулентному ядрі» турбулентного потоку крім переміщення рідини в напрямку основної течії з деякою середньою швидкістю має місце неупорядкований пульсаційний рух рідких частинок від шару до шару з відповідним обміном кількістю руху, в результаті чого виникають турбулентні дотичні напруження $\tau_T \gg \tau_M$. Тому переважне значення мають втрати енергії, що виникають у результаті перемішування рідини.

Поміж в'язким підшаром і турбулентним ядром потоку існує деяка «буферна» зона максимального породження турбулентності, у якій в'язкі й турбулентні напруження порівнюювані між собою за величиною.

У загальному випадку втрати енергії на подолання сил тертя в кругло-циліндричній трубі залежать від середньої швидкості рідини, її в'язкості та діаметра труби d , тобто від числа Рейнольдса $Re = v_c d / \nu$, де $\nu = \mu / \rho$ – кінематичний коефіцієнт в'язкості, а також від відносної шорсткості внутрішньої поверхні трубопроводу.

Це відображається функціональними залежностями вигляду

$$\lambda = f(Re, \Delta/d), \quad (2.17)$$

де Δ – абсолютна еквівалентна шорсткість стінки труби, тобто висота виступів еквівалентної рівнозернистої шорсткості стінки, що забезпечує однаковий із реальною шорсткістю гідравлічний опір при тій самій довжині труби (у першому наближенні Δ – середня висота виступів шорсткості обтічної поверхні); Δ/d – відносна шорсткість поверхні. Для металевих труб еквівалентна шорсткість складає 0,5...0,7 максимальної висоти виступів природної шорсткості. В розрахунках можна приймати для сталених суцільнотягнутих (безшовних) труб: нових $\Delta \approx 0,02 \div 0,2 \text{ мм}$, після декількох років експлуатації $\Delta \approx 0,15 \div 0,3 \text{ мм}$ і більше.

При ламінарному русі рідини, а також турбулентному, але при відносно невеликих значеннях числа Re (так звана зона «гідравлічно гладкого тертя») вплив відносної шорсткості на коефіцієнт гідравлічного тертя λ вироджується, і $\lambda = \lambda(Re)$. При дуже великих величинах Re (зона «цілком шорсткого тертя») — навпаки: вироджується вплив числа Re на коефіцієнт λ , і $\lambda = f(Re, \Delta/d)$. В проміжному діапазоні чисел Re

турбулентної течії (зоні «змішаного» тертя) залишається найбільш загальний випадок, що відповідає залежностям вигляду (2.17).

Розглянемо це докладніше щодо стаціонарного стабілізованого руху в'язкої рідини в круглій циліндричній трубі. При будь-якому режимі течії швидкість руху рідини безпосередньо на стінці дорівнює нулю (виконується умова «прилипання» частинок на стінці).

При ламінарному режимі найближчий до поверхні труби шар рідини досить плавно й повільно ковзає по прилиплим до стінки рідким частинкам. Інші шари рідини рухаються теж плавно, приблизно паралельно один одному, із зсувом, тобто з характерним градієнтом поздовжньої швидкості по нормалі до стінки. Згідно з законом тертя Ньютона цей градієнт швидкості спричиняє появу сил в'язкості усередині рідини. Таким чином, при ламінарному русі має місце тільки тертя між шарами рідини, тому й коефіцієнт гідравлічного тертя λ залежить тільки від числа Рейнольдса та не залежить від шорсткості поверхні, що обмежує потік. Для круглої циліндричної труби є справедливою **формула Пуазейля**

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}. \quad (2.18)$$

При турбулентному режимі течії характер функціональних залежностей (2.17) визначається співвідношенням між товщиною в'язкого підшару δ та середньою висотою виступів шорсткості Δ стінки.

При цьому можливі три випадки:

1) $\delta \gg \Delta$, тобто в'язкий підшар повністю покриває виступи шорсткості, а турбулентне ядро потоку ніби ковзає по в'язкому підшару (так звана «гладкостінна» течія). Ці умови спостерігаються при $4000 < \text{Re} \leq 20d/\Delta$ (на практиці приймають приблизно при $2320 \leq \text{Re} \leq 10^5$), де d/Δ – відносна гладкість поверхні. Шорсткість стінки не впливає на втрати напору на тертя, тому труби в такій зоні руху рідини називається «гідравлічно гладкими». Коефіцієнт λ може бути визначений за **формулою Блазіуса**

$$\lambda = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}}. \quad (2.19)$$

Більш точно в діапазоні $2320 \leq Re \leq 4000$ справедлива **формула Френкеля**

$$\lambda = 2,7 / Re^{0,53}.$$

2) $\delta \approx \Delta$, тобто товщина в'язкого підшару сумірна з висотою виступів шорсткості.

Це спостерігається при $20d/\Delta < Re \leq 500d/\Delta$. Виступи шорсткості, як погано обтічні геометричні неоднорідності, все більше виходять за межі в'язкого підшару, це спричиняє додаткові вихроутворення і перемішування рідини, що збільшує втрати напору. Тому в цій зоні руху коефіцієнт λ залежить як від Re , так і від відносної шорсткості Δ/d . Серед багатьох формул для зазначеного діапазону Re найбільш поширена зручна **формула Альтшуля**

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}. \quad (2.20)$$

Таку зону називають перехідною, або **зоною «змішаного» тертя**, що відповідає доквадратичному закону опору. Значення числа Re початку перехідної зони (верхня межа гідралічно гладкої зони) тим менше, чим більша відносна шорсткість стінки труби.

3) $\delta \ll \Delta$, що має місце при $Re > 500d/\Delta$. В'язкий підшар значною мірою зруйновано і турбулентне ядро потоку практично досягає шорсткої стінки. При цьому посилюється вихроутворення за кожним виступом шорсткості і вплив сил молекулярної в'язкості, а отже, числа Re , на характеристики течії та втрати напору, стає зникаюче малим («**зона турбулентної автомодельності**»). Коефіцієнт λ залежить тільки від відносної шорсткості, тому труби в цій зоні називають «**цілком шорсткими**», або «**гідралічно шорсткими**». Одною з найбільш зручних і достатньо точних для практики формул щодо таких труб є **формула Шифрінсона**

$$\lambda = 0,11 (\Delta/d)^{0,25}. \quad (2.21)$$

З огляду на залежності (2.16) і (2.21), цю зону ще називають «**зоною квадратичного закону опору**», оскільки при підстановці (2.21) в формулу Дарсі-Вейсбаха зберігається квадрат швидкості v_c^2 .

При практичних розрахунках по визначенню опору тертя для всіх трьох зон турбулентного режиму течії можна використовувати зазначену вище універсальну формулу Альтшуля, яка за умов гідралічно гладких і цілком шорстких труб дає результати, які практично збігається з результатами розрахунку за формулами Блазіуса і Шифрінсона відповідно.

Треба пам'ятати, що застосування всіх наведених формул є цілком коректним для стабілізованих течій, які формуються в трубі з плавним входом тільки після **початкової ділянки**, довжина якої приблизно визначається наступним чином: для ламінарного режиму $\ell_{стаб} \approx 0,029 Re \cdot d$ (тобто при $Re = 2000$, $\ell_{стаб} \approx 60d$); для турбулентного режиму $\ell_{стаб} \approx (30 \div 40)d$. В інших випадках формулами для λ можна користуватися у деякому наближенні, втім яке є достатнім щодо звичайної точності інженерних розрахунків.

Першим системно дослідив вплив числа Рейнольдса і відносної шорсткості труб на їх опір І.І. Нікурадзе (Геттінген, Німеччина, 1932-1933 р.р.), але його дослідження проводилися не для промислових труб, а для модельних труб із штучно створеною, рівномірно розподіленою по внутрішній поверхні труби зернистою (піщаною) шорсткістю. Більш детально графік І.І. Нікурадзе описано в лекційному курсі. Наведені вище формули (2.18)–(2.21) придатні для розрахунків гідравлічного опору саме технічних трубопроводів (сталевих, чавунних тощо).

2.3.3. Розрахункове визначення місцевих втрат напору.

Розрахункове визначення місцевих втрат напору на будь-якій фасонній ділянці трубопроводу здійснюється за допомогою **формули Вейсбаха**, згідно з якою втрати енергії виражено у частках швидкісного напору:

$$h_m = \zeta_j \frac{v_{cj}^2}{2g}, \quad (2.22)$$

де $v_{cj} = Q/S_j$ — середня швидкість рідини у вхідному ($j=1$) чи вихідному ($j=2$) поперечних перерізах площею S_j досліджуваної ділянки трубопроводу; ζ_j — коефіцієнт місцевого опору, віднесений до відповідного перерізу j (тобто у загальному випадку, коли $S_1 \neq S_2$, існує два значення коефіцієнта місцевого опору: ζ_1 — відносно вхідного перерізу ділянки, та ζ_2 — відносно її вихідного перерізу, причому $\zeta_1 \neq \zeta_2$).

Важливо підкреслити: взаємна відповідність значень ζ_j та v_{cj} , що підкреслено одним індексом j , має сенс лише для місцевих опорів змінного поперечного перерізу. Для ділянок з $S_1 = S_2$, тобто при $v_{c1} = v_{c2}$, задача спрощується: $\zeta_1 = \zeta_2 = \zeta$.

Значення коефіцієнтів місцевих опорів в залежності від геометричних параметрів відповідної ділянки трубопроводу та числа Рейнольдса наводяться в гідравлічних довідниках. Слід зауважити, що наведені у довідниках величини коефіцієнтів місцевих опорів, а також формули та графіки для визначення їх відповідають випадкам, коли в ділянку місцевого опору входить потік із сформованою при даному режимі течії епюрою розподілу швидкості, а вихідний переріз ділянки розташовано на відстані, де під дією сил в'язкості відбулося відновлення епюри розподілу швидкості, що була деформована місцевим опором.

На ділянці раптового розширення трубопроводу втрати напору, за умов нехтування деформаціями епюр швидкості у вхідному та вихідному перерізах, можуть бути визначені згідно з **теоремою Борда-Карно**:

$$h_{p.p} = \frac{(v_{c1} - v_{c2})^2}{2g}, \quad (2.23)$$

тобто: **«втрати напору при раптовому розширенні дорівнюють швидкісному напору від втраченої швидкості»** (v_{c1} та v_{c2} — середні швидкості руху рідини до та після раптового розширення). Через різке гальмування потоку при раптовому розширенні каналу ці втрати напору іноді називають **втратами на «удар»**.

Формула (2.23) задовільно підтверджується дослідями у випадку турбулентної течії, коли переріз 2 береться достатньо далеко за місцем розширення.

Загальні втрати напору в системі різних послідовно розташованих ділянок трубопроводу знаходять за принципом суперпозиції (накладання) втрат енергії:

$h_g = \sum_{i=1}^n h_{\ell,i} + \sum_{j=1}^m h_{m,j}$, де підсумовування здійснюється відповідно за прямолінійними i -ми ділянками рівномірного руху та за j -ми ділянками місцевих опорів. Цей спосіб не враховує взаємний вплив (інтерференцію) місцевих опорів, тому його слід вважати наближенням.

ДОДАТОК 3

Системи одиниць вимірювання механічних величин

Сукупність одиниць, в якій для вимірювання механічних величин достатньо вибрати довільно три одиниці: одиниця довжини (ℓ), одиниця маси (m) або сили (F), та одиницю часу (t). Така сукупність має назву *системи одиниць*. Вибрані вище довільно одиниці системи називають **основними одиницями**, а всі решта — **похідними одиницями**.

Нагадаємо найбільш поширені в інженерній практиці одиниці вимірювання та зв'язок між ними (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1.

Система СІ	Система МКГСС (технічна)	Система СГС
Основні одиниці		
$\ell, м; \quad m, кг; \quad t, с$ (кг — кілограм маси)	$\ell, м; \quad F, кгс=кГ; \quad t, с$ (кГ — кілограм сили)	$\ell, м; \quad m, г; \quad t, с$ (г — грам маси)
Похідні одиниці		
Сила: $F=ma, кг \cdot м/с^2=Н$	Маса: $m=F/a, кГ \cdot с^2/м$ («технічна одиниця маси» = т.о.м.)	Сила: $F=ma, г \cdot см/с^2=дин$ (1 г·см/с ² = 1 діна)
Робота: $A=F \cdot \ell, Н \cdot м=Дж$	Робота: $A=F \cdot \ell, кГ \cdot м=кГм$	Робота: $A=F \cdot \ell, дин \cdot см=ерг$
Потужність: $N=A/t,$ $Дж/с=Вт$ $1кВт=10^3 Вт; 1МВт=10^6 Вт$	Потужність: $N=A/t,$ $кГм/с; 1к.с.=75 кГм/с$ (к.с. — «кінська сила»)	Потужність: $N=A/t,$ $ерг/с$

Зв'язок між одиницями вимірювання

1 кГ = 1 кг · 9,80665 м/с² ≈ 9,81Н, де $g_{ст} = 9,80665 \text{ м/с}^2$ — стандартна величина прискорення вільного падіння;

1 Н = 10⁵ дін; 1 Дж = 10⁷ ерг; 1 кГм ≈ 9,81 Дж = 9,81 · 10⁷ ерг; 1 кВт ≈ 1,36 к.с.

Одиниці вимірювання тиску:

1 *технічна атмосфера*: 1 ат = 1 кГ/см² ≈ 98100 Н/м² ≡ 9,81 · 10⁴ Па = 0,981 бар = 0,0981 МПа, що відповідає 735,56 мм рт. ст або 10 м вод. ст; 1 бар = 10⁵ Па;

1 *фізична атмосфера* (нормальний барометричний тиск) = 101325 Па ≈ 1,033 ат, що відповідає 760 мм рт. ст або 10,33 м вод. ст.

Література

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1987. – 840 с.
2. Повх И.Л. Техническая гидромеханика. – Л.: Машиностроение, 1976. – 504 с.
3. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика. – М.: Машиностроение, 1987. – 440 с.
4. Аэрогидромеханика / А.М. Мхитарян, В.В. Ушаков, А.Г. Баскакова, В.Д. Трубенюк; Под общ. ред. А.М. Мхитаряна. – М.: Машиностроение, 1984. – 352 с.
5. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. Ч. 1,2. – М.: Наука, 1991. – 600 с., 304 с.
6. Самойлович Г.С. Газодинамика. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.
7. Єфремов І.І., Турик В.М. Основи механіки рідини та газу. – К.: НМК ВО, 1990. – 84 с.
8. Колчунов В.І. Теоретична та прикладна гідромеханіка: Навч. посібник. – К.: НАУ, 2004. – 336 с.
9. Сборник задач по машиностроительной гидравлике / Под ред. И.И. Куколевского и Л.Г. Подвидза. – М.: Машиностроение, 1981. – 461 с.
10. Самойлович Г.С., Нитусов В.В. Сборник задач по гидроаэромеханике. – М.: Машиностроение, 1986. – 150 с.
11. Аэродинамика в вопросах и задачах / Н.Ф. Краснов, В.Н. Кошевой, А.Н. Данилов и др.; Под ред. Н.Ф. Краснова. – М.: ВШ, 1985. – 759 с.
12. Грабовский А.М., Иванов К.Ф., Дунчевский Г.Н. Гидромеханика и газовая динамика. Сборник задач. – К.: Вища школа, 1987. – 64 с.